第45卷 第6期
2022年11月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 45 No. 6
Nov. 2022

塔里木盆地西南缘表土碳同位素组成特征分析

琚 立[1,2,3]， 冉 敏[1,2,3]， 杨运鹏[1,2,3]， 王 馨[1,2,3]

（1. 河南大学地理与环境学院，河南 开封 475004；2. 河南大学环境规划国家级实验教学示范中心，河南 开封 475004；3. 河南大学地球系统观测与建模河南省重点实验室，河南 开封 475004）

摘 要：土壤碳同位素可以反映生长植被的同位素组成，从而进一步反映当时的植被类型以及气候环境状况。已有的研究显示，不同地区碳同位素与气候因子的关系存在显著差异，因此在不同区域开展土壤碳同位素与气候因子之间相关性关系分析对古气候的重建至关重要。通过采集塔里木盆地西缘帕米尔地区和盆地南缘和田地区策勒县的表土沉积物，分析测定后获得其有机碳同位素，并将该表土有机碳同位素数据与气候因子进行相关性分析，以探明研究区有机碳同位素组成特征及其潜在的气候意义。结果表明：帕米尔地区和策勒地区的表土碳同位素变化对气候因子的响应存在明显差异。气温方面，帕米尔地区与气温呈正相关，其中与冷季气温相关性最好（r=0.598，P<0.01）；策勒地区与气温呈负相关，其中与暖季气温相关性最好（r=−0.684，P<0.01）。降水方面，帕米尔地区与降水量的相关性不显著；策勒地区与年均降水量呈弱负相关，与暖季降水量呈弱正相关，与冷季降水量呈显著的负相关关系（r=−0.632，P<0.01）。上述分析表明基于沉积物有机碳同位素来重建古气候时应充分考虑区域差异的影响。

关 键 词：表土$\delta^{13}C_{org}$；气温；降水量；相关性分析；干旱区

文章编号：1000－6060(2022)06－1805－09(1805～1813)

古气候研究在了解现代气候背景和预测未来气候变化工作中起到了重要作用，其主要研究途径是通过一些气候代用指标来对古气候进行定性或者（半）定量重建[1-2]。现已开展的古气候研究代用指标主要包括粒度、磁化率、碳同位素、孢粉和生物地球化学指标等[3-10]，沉积物有机碳同位素是其中一项极其重要的代用指标，已广泛应用于古气候和古植被重建[11-15]。植物生理学研究表明，植物不同的光合作用途径导致C_3植物和C_4植物之间的有机碳同位素值（$\delta^{13}C_{org}$）具有不同的分布范围。C_3植物$\delta^{13}C_{org}$的范围通常在−22‰～−34‰，平均值约为−27‰；C_4植物$\delta^{13}C_{org}$的范围通常在−9‰～−17‰，平均值约为−13‰[16-18]。对现代植物的研究显示，C_3植物在低温、湿润以及高CO_2浓度的环境中有生长优势；而C_4植物则更适宜在高温、干旱以及低CO_2浓度的环境中生长[19]。因此通过分析沉积物中有机质碳同位素组成就可以反演当时植被组成并进一步重建古气候变化。虽然有机碳同位素在古气候研究中已经广泛应用，但不同区域有机碳同位素与气候因子之间的相关性可能存在差异，仍然需要通过进行土壤有机碳同位素与现代气候因子之间的研究来验证从不同区域沉积物有机碳同位素中提取的古气候和古植被信息的可靠性。

目前，已有不少学者对土壤中有机碳同位素和现代气候因子之间的相关性关系展开了研究。Rao等[20]通过分析全球不同地区的表土有机碳同位素得出，气温是决定C_3/C_4植物相对丰度的主要气候因素。Stevenson等[21]对美国华盛顿州帕卢斯地区的土壤有机碳同位素与年均降水量之间的关系进行研究，结果显示二者呈现出显著的负相关关系。在对欧亚大陆的研究中，Feng等[11]采集了蒙古高原南北断面196个表层土壤样品，通过分析其有机碳同

收稿日期：2022-03-21； **修订日期**：2022-06-09
基金项目：国家自然科学基金（41502168，41771234）资助
作者简介：琚立（1997-），男，硕士研究生，主要从事生物地球化学与第四纪环境变化研究. E-mail: juli@henu.edu.cn
通讯作者：冉敏（1983-），男，博士，副教授，主要从事生物地球化学与第四纪环境变化研究. E-mail: ranm@vip.henu.edu.cn

位素组成，建立了有机碳同位素与气候因子之间的线性回归方程，结果表明蒙古高原表土$\delta^{13}C_{org}$与年平均降水量呈明显的负相关。在中国的研究范围内，国内外学者已对中国北方干旱半干旱区、中国东部以及青藏高原等地区进行了研究工作[22-25]。总体来讲，在中国北部和南部，与降水相比表土有机碳同位素变化与气温之间的关系更为紧密，但相关性却相反：即中国北部与年均气温呈正相关，而南部呈负相关[24]。在对中亚干旱区的研究中，Wang等[26]通过对伊朗北部44个表土样品进行分析得出，表土$\delta^{13}C_{org}$与年均降水量呈显著的负相关关系，认为降水是控制该地区表土$\delta^{13}C_{org}$变化的主要气候因素。Zhang等[24]认为新疆北部地区全新世$\delta^{13}C_{org}$的偏负是由气温降低和降水量增加所引起的。Rao等[27]则认为新疆阿勒泰地区$\delta^{13}C_{org}$变化主要受气温控制且二者呈正相关关系。上述研究显示不同地区有机质碳同位素与气候因子之间的相关性存在明显的差异，因此中亚干旱区表土有机碳同位素与气候因子之间的相关性分析研究还需要在更多的区域开展，以期进一步厘清研究区有机碳同位素组成特征及其潜在的气候意义。本文将对帕米尔地区和策勒地区表土$\delta^{13}C_{org}$的组成特征展开研究，并对上述两地表土$\delta^{13}C_{org}$变化与气候因子之间的相关性关系进行分析。

本文采集并分析了新疆帕米尔地区(n=30)和策勒地区(n=20)的表层土壤碳同位素组成特征，并进一步分析了这2个地区表层土壤的$\delta^{13}C_{org}$与该地区的海拔、年均气温(MAT)、暖季气温(WST)、冷季气温(CST)、年均降水量(MAP)、暖季降水量(WSP)、冷季降水量(CSP)之间的关系，为研究区古气候的研究工作提供基础。

1 研究区概况

塔里木盆地西缘与帕米尔高原相连(图1a)(73°40′~96°18′E，34°25′~40°10′N)。帕米尔高原横跨中国新疆西南、阿富汗东北和塔吉克斯坦东南，位于中国境内的区域主要是其东部[28]，大致位于克孜勒苏柯尔克孜自治州和喀什地区境内(图1b)。帕米尔高原的气候类型属于严寒的大陆性高山气候，尤以东帕米尔高原的大陆性更为显著。东帕米尔高原年均气温为1 ℃左右，因有高山阻挡西来的湿润气流，导致其年均降水量仅为75~100 mm。

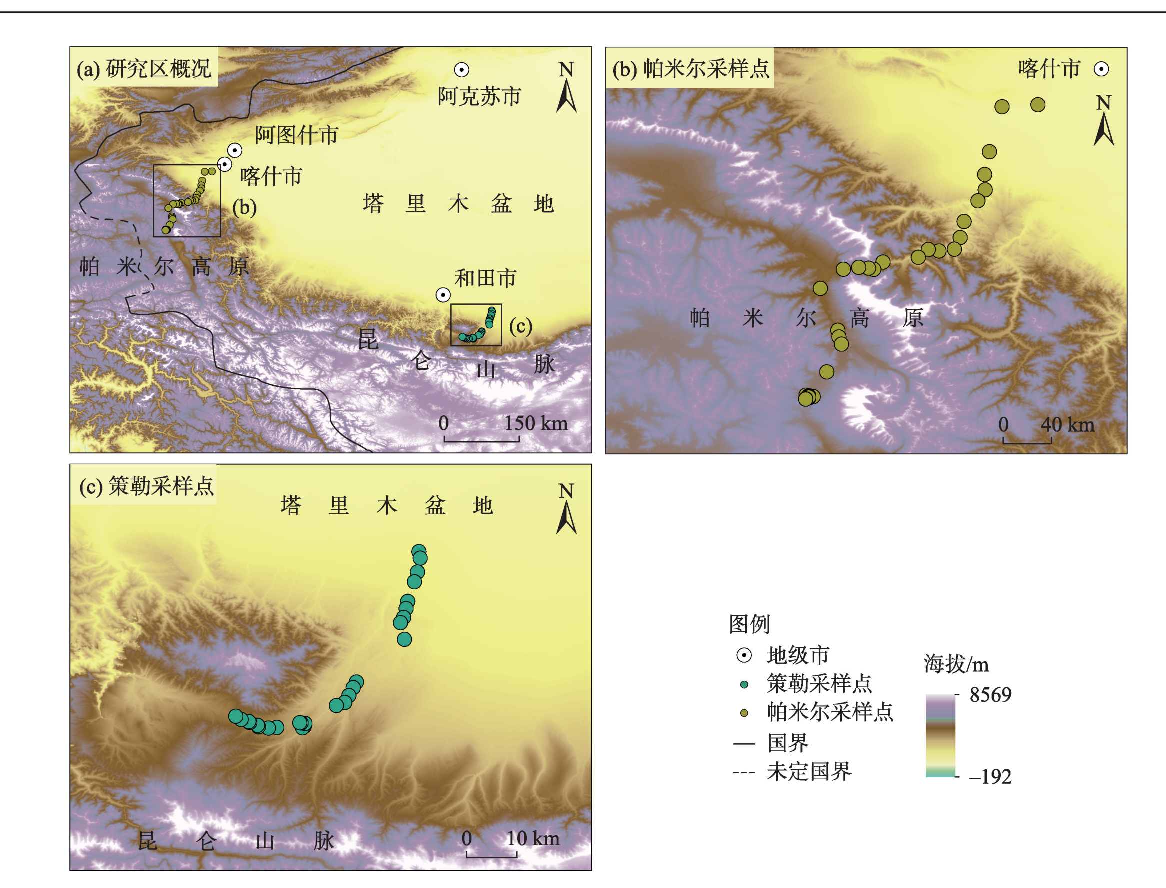
和田地区的策勒县位于塔里木盆地南缘(图1a)(80°03′~82°10′E，35°18′~39°30′N)。策勒县南接昆仑山脉，北与塔克拉玛干沙漠接壤，整体地势南高北低(图1c)，属于大陆型极端干旱荒漠气候[29]。1981—2010年策勒县年均气温12.2 ℃，年均降水量为43.5 mm，暖季月均降水量为6.2 mm。

资料显示，帕米尔地区和策勒地区的降水量相差较大，且补给水源也存在差异，帕米尔地区主要为冰川融水，策勒地区主要为自然降水补给。此外，两地的植被也有所差别，帕米尔地区植被呈垂直分带生长，植被类型有草甸(3500 m以下)、荒漠植被(3500~4500 m)、高寒草原植被(4000 m以上)、高山稀疏植被(4500 m以上)[30]，而策勒地区则主要为以盐生草为优势种的荒漠植被[31]。帕米尔地区和策勒地区均为生态环境较为脆弱的区域，气候易受到影响，而目前对两地的气候研究却存在缺失。基于上述因素，选择在此区域开展研究工作。

2 材料与方法

本次表土样品采集工作完成于2021年7月，具体采样过程为：选择采样地附近砂砾较少的土样，用铁铲铲取表层深度为5 cm的土壤500 g，将采集到的样品装入自封袋后运回实验室并在低温下保存以备实验分析。所有表土样品在室温下干燥研磨后过200目筛，用浓度为6%的盐酸去除掉样品中的无机碳酸盐，再用去离子水将样品洗至中性，后将样品在室温下进行干燥，取9~11 mg干燥后的样品用锡箔舟密封后准备进行碳同位素检测[11,26,32]。有机碳同位素的测量在河南大学地理与环境学院气候与环境变化实验室中进行。所使用的仪器为美国Thermo Fisher公司生产的型号为MAT 253的气体稳定同位素比质谱仪。具体原理为：将样品中的有机碳经高温煅烧后转化成CO_2气体，再将经离子源离子化后的气体在磁场的作用下进行分离，最后用接收器采集数据，从而测定样品的不同质量数碳原子同位素相对含量。在测量过程中，采取每6个样品中插入1~2个标准样品的测量方式来避免误差。该仪器的测量误差在±0.2‰以内。

文中所有表土采样点的气温和降水数据均来自网站http://www.worldclim.org/。通过ArcGIS软件



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2021)5443号的标准地图制作，底图边界无修改。

图1　采样点海拔梯度

Fig. 1　Elevation gradient of sampling sites

对数据进行提取，所采用的数据为累年月均值数据，时间范围为1970—2000年，分辨率为10 min。文中所述暖季为4—9月，冷季为12月—次年2月。

3　结果与分析

3.1　表土$\delta^{13}C_{org}$组成特征

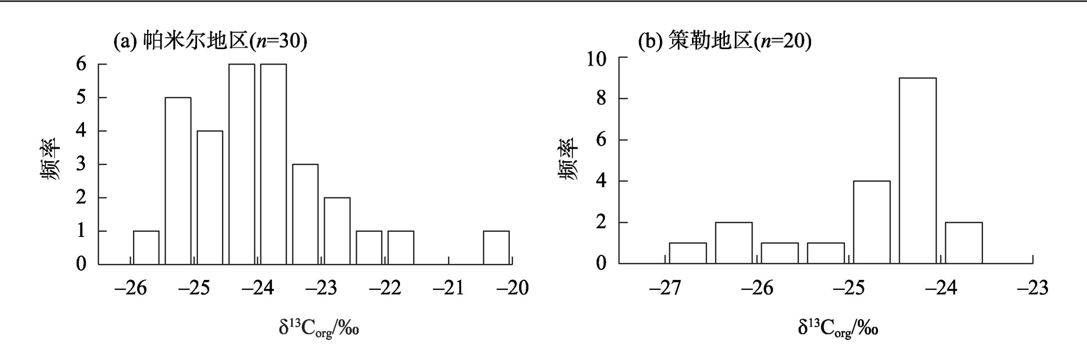
图2是帕米尔地区和策勒地区表土$\delta^{13}C_{org}$分布图。由图2a及表1可以看出，帕米尔地区表土$\delta^{13}C_{org}$的范围主要分布在−25.722‰~−20.415‰，平均值为−23.969‰。频率最高值在−25.5‰~−23.5‰附近，占总数比70%。策勒地区表土$\delta^{13}C_{org}$主要分布在−26.525‰~−23.644‰，平均值为−24.767‰（表1）。频率最高的值出现在−25‰~−24‰附近，占总数比65%（图2b）。由此可以看出，在帕米尔地区，仅有2个样点的表土$\delta^{13}C_{org}$大于−22‰，表明该区域的植被类型以C_3植物为主。而在策勒地区，所采集的20个样点的表土$\delta^{13}C_{org}$均小于−22‰，这表明策勒地区的植被类型也几乎全部为C_3植物。

3.2　表土$\delta^{13}C_{org}$与海拔的相关性分析

图3显示了帕米尔地区和策勒地区表土$\delta^{13}C_{org}$与海拔关系。从图3a可以看出帕米尔地区表土$\delta^{13}C_{org}$与海拔之间相关性显著（r=−0.494，P<0.01），表土$\delta^{13}C_{org}$随海拔的升高而偏负。帕米尔地区表土$\delta^{13}C_{org}$与海拔之间的相关关系可表示为：$y=-5.96\times10^{-4}x-22.25$（图3a）。从图3b可以看出策勒地区表土$\delta^{13}C_{org}$与海拔之间相关性显著（$r$=0.732，$P$<0.01），表土$\delta^{13}C_{org}$随海拔的升高而偏正。策勒地区表土$\delta^{13}C_{org}$与海拔之间的关系可表示为：$y=1.15\times10^{-3}x-27.53$（图3b）。

3.3　表土$\delta^{13}C_{org}$与气温的相关性分析

图4显示了帕米尔地区30个表层土壤和策勒地区20个表层土壤的$\delta^{13}C_{org}$与气温参数（MAT、WST、CST）的相关性分析结果。从图4a和图4b中可以看出，帕米尔地区表土$\delta^{13}C_{org}$和MAT呈显著正相关关系（$y=0.12x-24.04$，n=30，r=0.594，P<0.01），策勒地区表土$\delta^{13}C_{org}$和MAT呈显著负相关关系（$y=-0.14x-23.82$，n=20，r=−0.675，P<0.01）。从图4c和图4d中可以看出，帕米尔地区表土$\delta^{13}C_{org}$和WST



注：$\delta^{13}C_{org}$为有机碳同位素值。下同。

图2 表土$\delta^{13}C_{org}$组成

Fig. 2 Composition of surface soil $\delta^{13}C_{org}$

表1 采样点海拔和表土$\delta^{13}C_{org}$统计值

Tab. 1 Statistical value of elevation and surface soil $\delta^{13}C_{org}$ of sampling sites

统计值	帕米尔地区		策勒地区	
	海拔/m	$\delta^{13}C_{org}$/‰	海拔/m	$\delta^{13}C_{org}$/‰
最大值	4075	−20.415	3128	−23.644
最小值	1348	−25.722	1639	−26.525
平均值	2876	−23.969	2395	−24.767
标准误差	169	0.204	115	0.181

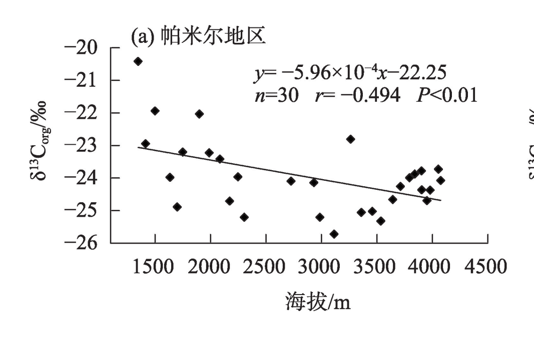
注：$\delta^{13}C_{org}$为有机碳同位素值。

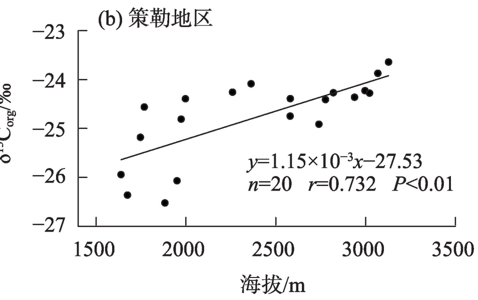
呈显著正相关关系(y=0.11x−24.97，n=30，r=0.593，P<0.01)，策勒地区表土$\delta^{13}C_{org}$与WST呈显著负相关关系(y=−0.12x−22.92，n=20，r=−0.684，P<0.01)。图4e和图4f显示了帕米尔地区和策勒地区表土$\delta^{13}C_{org}$与CST的关系，帕米尔地区表土$\delta^{13}C_{org}$与CST呈显著正相关关系(y=0.15x−22.11，n=30，r=0.598，P<0.01)，策勒地区表土$\delta^{13}C_{org}$与CST呈显著负相关(y=−0.18x−25.93，n=20，r=−0.646，P<0.01)。

从上述分析可以看出，帕米尔地区和策勒地区表土$\delta^{13}C_{org}$与该地区气温的相关性均较为显著，帕米尔地区表土$\delta^{13}C_{org}$与CST的相关性最好(r=0.598)，策勒地区表土$\delta^{13}C_{org}$与WST的相关性最好(r=−0.684)。策勒地区的相关性均好于帕米尔地区，两地表土$\delta^{13}C_{org}$的变化受气温影响较为明显。

3.4 表土$\delta^{13}C_{org}$与降水量的相关性分析

图5显示了帕米尔地区和策勒地区的表土$\delta^{13}C_{org}$与降水量的关系。由图5a和图5b可以看出，帕米尔地区表土$\delta^{13}C_{org}$和MAP呈不显著负相关(y=−8.2×$10^{-3}x$−23.15，n=30，r=−0.145，P>0.05)，策勒地区表土$\delta^{13}C_{org}$和MAP呈弱负相关关系(y=−0.18x−18.8，n=20，r=−0.485，P<0.05)。图5c和图5d显示了帕米尔地区和策勒地区表土$\delta^{13}C_{org}$与WSP的关系，帕米尔地区表土$\delta^{13}C_{org}$与WSP呈不显著负相关(y=−0.02x−22.49，n=30，r=−0.230，P>0.05)，策勒地区表土$\delta^{13}C_{org}$与WSP呈弱正相关关系(y=0.11x−27.05，n=20，r=0.483，P<0.05)。图5e和图5f为帕米尔地区和策勒地区表土$\delta^{13}C_{org}$与CSP的关系，帕米尔地区表土$\delta^{13}C_{org}$与CSP呈不显著正相关(y=0.05x−24.31，n=30，r=0.127，P>0.05)，策勒地区表土$\delta^{13}C_{org}$与CSP呈显著负相关(y=−0.34x−24.22，n=20，r=−0.632，P<0.01)。

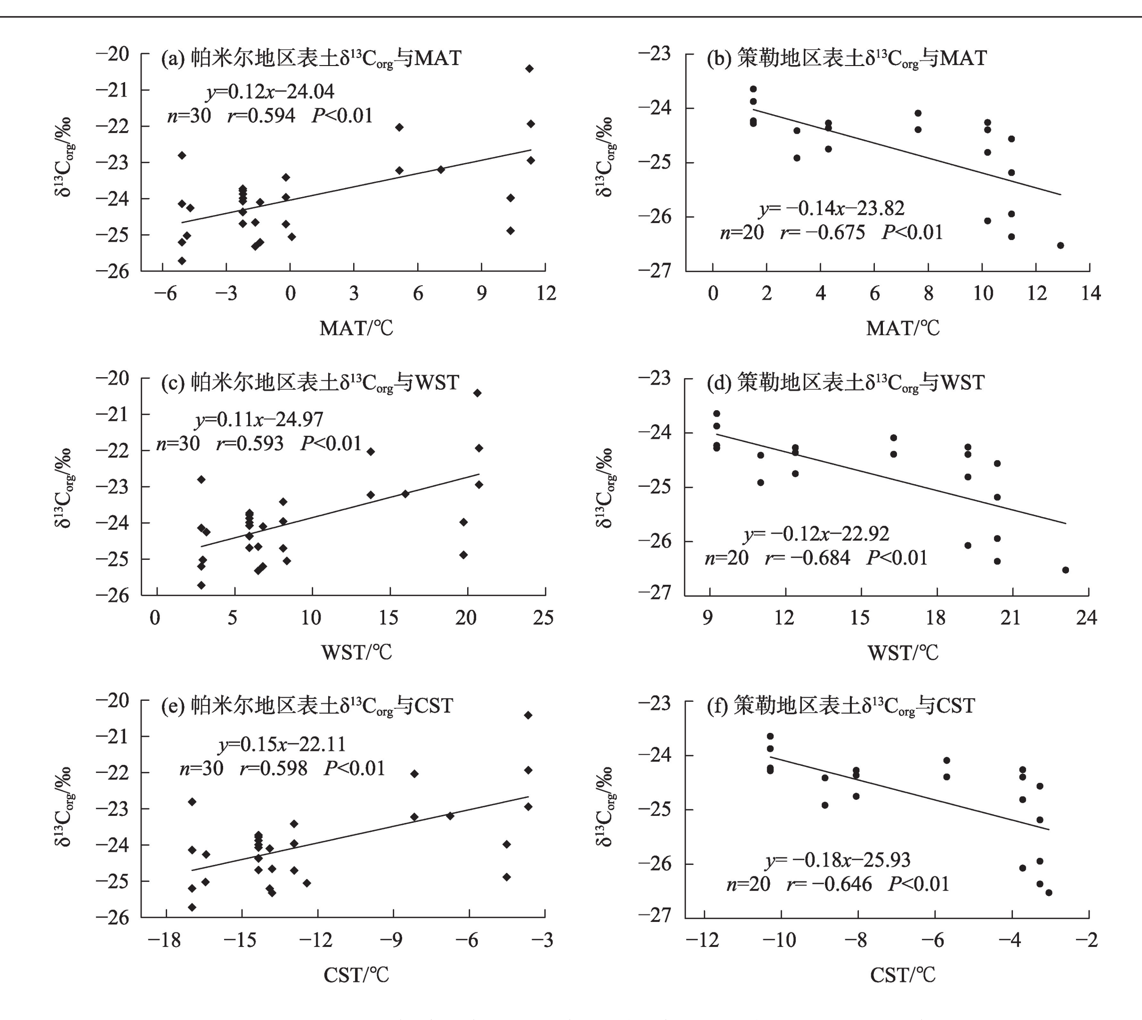




注：公式中y为$\delta^{13}C_{org}$；x为海拔。n为样点数；r为相关系数；P为信度水平。下同。

图3 表土$\delta^{13}C_{org}$与海拔关系

Fig. 3 Relationship between surface soil $\delta^{13}C_{org}$ and altitude



注：MAT、WST、CST分别为年均气温、暖季气温、冷季气温。公式中y为$\delta^{13}C_{org}$；x为气温。

图4　表土$\delta^{13}C_{org}$与气温关系

Fig. 4　Relationship between surface soil $\delta^{13}C_{org}$ and temperature

由此分析可以看出，帕米尔地区表土$\delta^{13}C_{org}$和降水量之间的相关度并不显著，策勒地区表土$\delta^{13}C_{org}$与MAP为弱负相关，但与WSP则为弱正相关，与CSP又为显著的负相关。分析表明，帕米尔地区和策勒地区两地的表土$\delta^{13}C_{org}$的变化受降水量影响较小。

4　讨 论

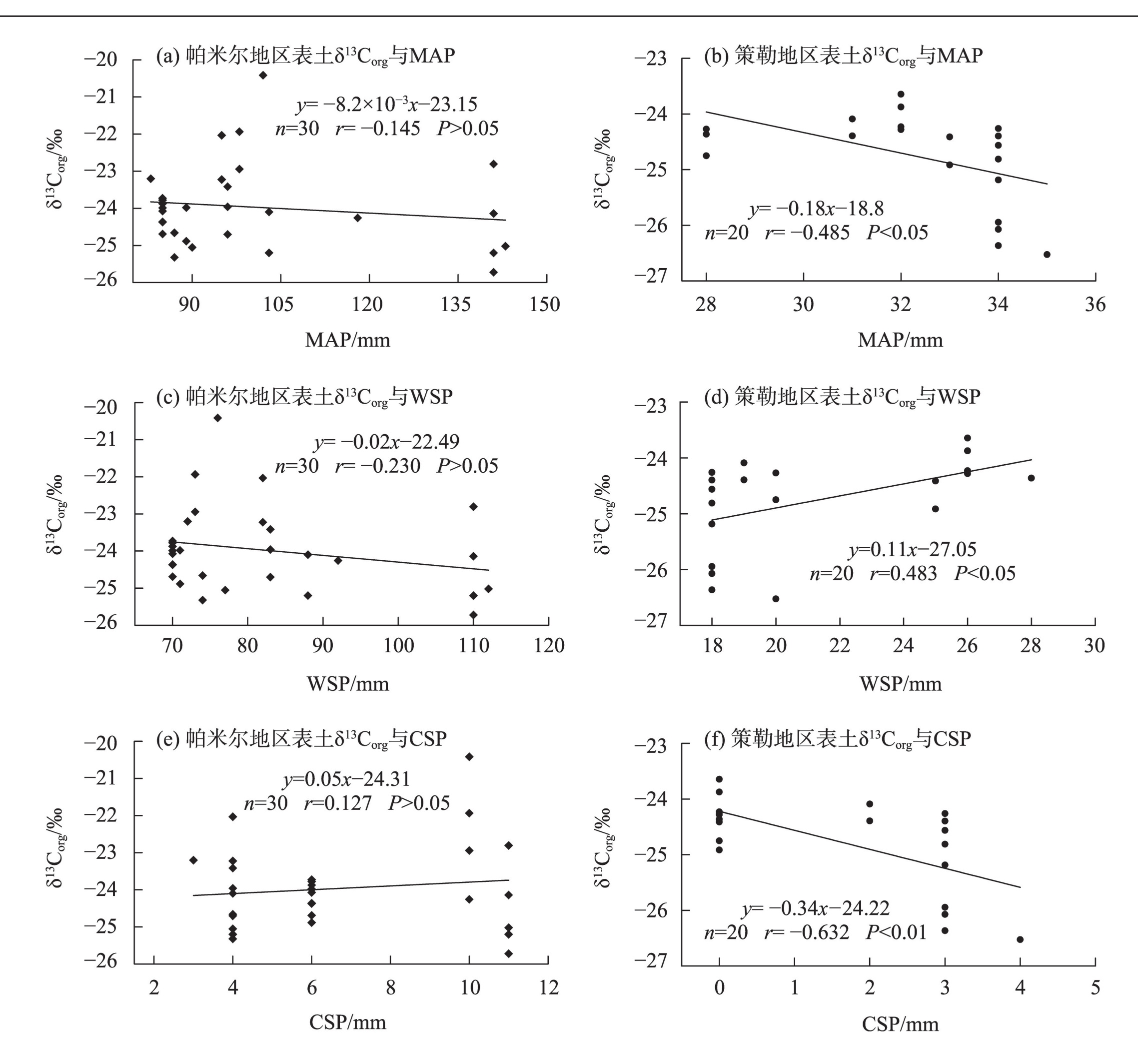
4.1　海拔对表土$\delta^{13}C_{org}$变化的影响

在新疆地区，水分的可利用性对植物$\delta^{13}C_{org}$的影响占主导地位[33]。在帕米尔地区，随着海拔的上升，由于气温的降低及降水量的增多，导致该地区的植被呈现出垂直地带性生长，并且在高海拔的低温、湿润环境下更有利于C_3植物的生长，从而导致帕米尔地区的表土$\delta^{13}C_{org}$随海拔的升高而偏负，这与新疆北部和青藏高原东南缘的玉龙雪山是相似的[24,34]。而在策勒地区，随着海拔的上升，气温也逐渐降低，但降水量并没有明显的增加，且策勒地区的降水量相较于帕米尔地区有显著的减少，导致其表土$\delta^{13}C_{org}$并没有像帕米尔地区一样随着海拔的升高而偏负，而是随着海拔的升高而偏正。这表明在策勒地区的高海拔地区，干旱的生态环境对C_3植物的生长仍有一定的影响。

4.2　气温对表土$\delta^{13}C_{org}$变化的影响

气温主要通过以下几个方面来影响$\delta^{13}C_{org}$的变化：通过影响光合作用过程中酶的活性和气孔导度；空气和叶片之间的水蒸汽压变化；植物的暗呼吸；以及蒸发引起的土壤水分变化[35-36]。这些复杂的机制导致$\delta^{13}C_{org}$与气温之间总体呈现出正相关关系[36]。

帕米尔地区表土$\delta^{13}C_{org}$与气温呈正相关，这与中国北部尤其是新疆北部地区是相似的[24]，并且符合总体的正相关趋势。其原因可能是在气温升高的条件下，酶的活性和光合速率增加，CO_2的同化速率加快。相关碳同位素的分馏作用减弱，导



注：MAP、WSP、CSP分别为年均降水量、暖季降水量、冷季降水量。公式中y为$\delta^{13}C_{org}$；x为降水量。

图5 表土$\delta^{13}C_{org}$与降水量关系

Fig. 5 Relationship between surface soil $\delta^{13}C_{org}$ and precipitation

致$\delta^{13}C_{org}$偏正[20,36-38]。与帕米尔地区不同是，策勒地区表土$\delta^{13}C_{org}$与气温呈负相关，这与中国南部地区是相似的[24]。研究认为，中国南部地区表土$\delta^{13}C_{org}$与气温呈负相关的原因可能是由于气温持续升高导致光合酶活性减弱。同时，为了保持水分供应，部分气孔会被关闭，从而降低植物的气孔导度。气孔导度降低和酶活性减弱的综合效应导致$\delta^{13}C_{org}$偏负[24]，这可能是策勒地区表土$\delta^{13}C_{org}$与气温呈负相关的主要原因。此外，帕米尔地区和策勒地区的水源补给也具有较大差异，前者受冰川融水的影响较大，后者主要受降水控制，同时帕米尔地区和策勒地区表土植被也存在明显差异，这可能是两地表土$\delta^{13}C_{org}$组成与气温之间相关性关系不同的潜在原因。

4.3 降水量对表土$\delta^{13}C_{org}$变化的影响

研究证明，在降水量增加的条件下，植物会逐渐打开气孔，气孔的传导性增加，从而导致$\delta^{13}C_{org}$偏负[39]。在帕米尔地区，表土$\delta^{13}C_{org}$与降水的相关性不显著，原因可能是受控于温度的冰川融水对植物的生长产生较大影响。在策勒地区，表土$\delta^{13}C_{org}$与CSP呈现出显著负相关关系，这与先前的研究结果是一致的[11,21,26]。

通过对比帕米尔地区和策勒地区两地表土$\delta^{13}C_{org}$与气温、降水量之间的相关性可以看出，两地表土$\delta^{13}C_{org}$均与气温的相关性较为显著，而与降水量的相关性则相对微弱。考虑到两地的气温和降水量数据，分析认为，两地表土$\delta^{13}C_{org}$与降水量相关性较差的原因可能是受该地区降水较少而引起的。帕米尔地区和策勒地区的年降水量均低于80 mm，属于极端干旱地区，极少的降水可能导致两地表土$\delta^{13}C_{org}$的变化受降水的影响较小，从而使得气温成为两地

表土$\delta^{13}C_{org}$变化的主要影响因素。

5 结 论

（1）表土$\delta^{13}C_{org}$与海拔之间相关性分析显示：帕米尔地区表土$\delta^{13}C_{org}$随海拔的升高而偏负，策勒地区表土$\delta^{13}C_{org}$随海拔升高而偏正；表土$\delta^{13}C_{org}$与气温之间相关性分析显示：帕米尔地区和策勒地区两地表土$\delta^{13}C_{org}$变化均主要受气温控制，但其与气温的相关性关系相反，即帕米尔地区表土$\delta^{13}C_{org}$与气温呈正相关，策勒地区表土$\delta^{13}C_{org}$与气温呈负相关；表土$\delta^{13}C_{org}$与降水量之间相关性分析显示：帕米尔地区表土$\delta^{13}C_{org}$的变化受降水影响较小，而策勒表地区土$\delta^{13}C_{org}$与降水有一定的相关性，与MAP为弱负相关，与WSP为弱正相关，与CSP为显著的负相关关系。

（2）在帕米尔地区和策勒地区，降水量的不同导致两地表土$\delta^{13}C_{org}$与海拔之间的相关性存在差异；受冰川融水以及两地植被类型差异的影响，帕米尔地区和策勒地区表土$\delta^{13}C_{org}$与气温之间的相关性存在差异；冰川融水以及极少的降水量导致两地表土$\delta^{13}C_{org}$与降水之间的相关性不显著。

（3）从研究结果可以看出，本文研究的2个地区表土$\delta^{13}C_{org}$与气候因子之间的相关性存在明显差异。表明在实际研究过程中，基于$\delta^{13}C_{org}$与气候参数之间的相关性应用到古气候研究中时，务必要注意其区域差异性和地理有效性。

参考文献（References）

[1] 余平辉, 马锦龙, 廖建波, 等. 柴达木盆地昆北地区路乐河组/下干柴沟组泥岩地层地球化学特征及古环境意义[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 679−686. [Yu Pinghui, Ma Jinlong, Liao Jianbo, et al. Geochemistry and paleoenvironment significance of Lulehe formation/Xiaganchaigou formation located in the north area of Qaidam Basin[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(3): 679−686.]

[2] 丁旋. 十五万年以来的古气候及其研究方法综述[J]. 地质科技情报, 1998, 17(2): 40−45. [Ding Xuan. Paleoclmate during the last 150000 years and its study methods[J]. Geological Science and Technology Information, 1998, 17(2): 40−45.]

[3] Ding Z L, Yu Z W, Rutter N W, et al. Towards an orbital time scale for Chinese loess deposits[J]. Quaternary Science Reviews, 1994, 13(1): 39−70.

[4] Zhou L P, Oldfield F, Wintle A G, et al. Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese loess[J]. Nature, 1990, 346(6286): 737−739.

[5] An Z S, Huang Y S, Liu W G, et al. Multiple expansions of C_4 plant biomass in East Asia since 7 Ma coupled with strengthened monsoon circulation[J]. Geology, 2005, 33(9): 705−708.

[6] Ning Y F, Liu W G, An Z S, et al. A 130-ka reconstruction of precipitation on the Chinese Loess Plateau from organic carbon isotopes[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2008, 270(1): 59−63.

[7] 秦锋, 赵艳. 基于孢粉组合定量重建古气候的方法在中国的运用及思考[J]. 第四纪研究, 2013, 33(6): 1054−1068. [Qin Feng, Zhao Yan. Methods of quantitative climate reconstruction based on palynological data and their applications in China[J]. Quaternary Sciences, 2013, 33(6): 1054−1068.]

[8] Wang W, Ma Y Z, Feng Z D, et al. A prolonged dry mid-Holocene climate revealed by pollen and diatom records from Lake Ugii Nuur in central Mongolia[J]. Quaternary International, 2011, 229 (1−2): 74−83.

[9] 谢树成, 黄咸雨, 杨欢, 等. 示踪全球环境变化的微生物代用指标[J]. 第四纪研究, 2013, 33(1): 1−19. [Xie Shucheng, Huang Xianyu, Yang Huan, et al. An overview on microbial proxies for the reconstruction of past global environmental change[J]. Quaternary Sciences, 2013, 33(1): 1−19.]

[10] 葛黄敏, 张传伦. 中国边缘海环境中GDGT的研究进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2016, 46(4): 473−488. [Ge Huangmin, Zhang Chuanlun. Research progress of GDGT in China' s marginal sea environment[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2016, 46(4): 473−488.]

[11] Feng Z D, Wang L X, Ji Y H, et al. Climatic dependency of soil organic carbon isotopic composition along the S-N transect from 34°N to 52°N in central-east Asia[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2008, 257(3): 335−343.

[12] Galy V, Francois L, France-Lanord C, et al. C_4 plants decline in the Himalayan Basin since the Last Glacial Maximum[J]. Quaternary Science Reviews, 2008, 27(13): 1396−1409.

[13] Rao Z G, Chen F H, Zhang X, et al. Spatial and temporal variations of C_3/C_4 relative abundance in global terrestrial ecosystem since the Last Glacial and its possible driving mechanisms[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(31): 4024−4035.

[14] 冉敏, 杨奇丽, 张晓森. 中亚哈萨克斯坦西部过去~3000年以来有机碳同位素变化及其意义[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27 (9): 60−65. [Ran Min, Yang Qili, Zhang Xiaosen. The organic carbon isotope variation and its paleoclimate indicator in western Kazakhstan during past 30000 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(9): 60−65.]

[15] Ran M, Feng Z D. Variation in carbon isotopic composition over the past ca. 46000 yr in the loess-paleosol sequence in central Kazakhstan and paleoclimatic significance[J]. Organic Geochemistry, 2014, 73: 47−55.

[16] Deities P. The isotopic composition of reduced organic carbon[J]. Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, 1980, 1: 329−406.

[17] O' Leary M. Carbon isotopic fractionation in plants[J]. Phytochemistry, 1981, 20(4): 553−567.

[18] Farquhar G D, Ehleringer A J R, Hubick K T. Carbon isotope dis-

crimination and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1989, 40(1): 503–537.

[19] Sage R, Wedin D. The biogeography of C_4 photosynthesis: Patterns and controlling factors[M]. San Diego: Academic Press, 1999: 313–373.

[20] Rao Z G, Guo W K, Cao J T, et al. Relationship between the stable carbon isotopic composition of modern plants and surface soils and climate: A global review[J]. Earth-Science Reviews, 2017, 165: 110–119.

[21] Stevenson B A, Kelly E F, Mcdonald E V, et al. The stable carbon isotope composition of soil organic carbon and pedogenic carbonates along a bioclimatic gradient in the Palouse region, Washington State, USA[J]. Geoderma, 2005, 124(1–2): 37–47.

[22] 王丽霞, 汪卫国, 李心清, 等. 中国北方干旱半干旱区表土的有机质碳同位素、磁化率与年降水量的关系[J]. 干旱区地理, 2005, 28(3): 311–315. [Wang Lixia, Wang Weiguo, Li Xinqing, et al. Correlation between the carbon isotope of organic matter and magnetic susceptibility in topsoil and the annual precipitation in arid and semiarid regions in north China[J]. Arid Land Geography, 2005, 28(3): 311–315.]

[23] Rao Z G, Jia G D, Zhu Z Y, et al. Comparison of the carbon isotope composition of total organic carbon and long-chain n-alkanes from surface soils in eastern China and their significance[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(24): 3921–3927.

[24] Zhang D L, Yang Y P, Ran M. Variations of surface soil $\delta^{13}C_{org}$ in the different climatic regions of China and paleoclimatic implication[J]. Quaternary International, 2020, 536: 92–102.

[25] 吕厚远, 顾兆炎, 吴乃琴, 等. 海拔高度的变化对青藏高原表土$\delta^{13}C_{org}$的影响[J]. 第四纪研究, 2001, 21(5): 399–406. [Lü Houyuan, Gu Zhaoyan, Wu Naiqin, et al. Effect of altitude on the organic carbon-isotope composition of modern surface soils from Qinghai-Xizang Plateau[J]. Quaternary Sciences, 2001, 21(5): 399–406.]

[26] Wang Q, Wang X, Wei H T, et al. Climatic significance of the stable carbon isotopic composition of surface soils in northern Iran and its application to an Early Pleistocene loess section[J]. Organic Geochemistry, 2019, 127: 104–114.

[27] Rao Z G, Huang C, Xie L H, et al. Long-term summer warming trend during the Holocene in Central Asia indicated by alpine peat α-cellulose $\delta^{13}C$ record[J]. Quaternary Science Reviews, 2019, 203: 56–67.

[28] 黄丹妮, 张震, 张莎莎, 等. 东帕米尔高原冰川运动特征分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 131–140. [Huang Danni, Zhang Zhen, Zhang Shasha, et al. Characteristics of glacier movement in the eastern Pamir Plateau[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 131–140.]

[29] 毛东雷, 蔡富艳, 李新国, 等. 塔克拉玛干沙漠南缘策勒流沙前缘与绿洲内部近地面逆温逆湿特征研究[J]. 干旱区地理, 2019, 42(5): 976–985. [Mao Donglei, Cai Fuyan, Li Xinguo, et al. Characteristics of air temperature inversion and relative humidity inversion between the near ground surface in the oasis and the leading edge of shifting sandy land of Cele in the southern margin of Taklimakan Desert[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(5): 976–985.]

[30] 王玉涛, 戴志刚, 杨世杰, 等. 东帕米尔高原盘羊分布与栖息地植被覆盖时空变化[J]. 生态学报, 2016, 36(1): 209–217. [Wang Yutao, Dai Zhigang, Yang Shijie, et al. The distribution of marco polo sheep and their habitat vegetation dynamics in east Pamir[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(1): 209–217.]

[31] 孙红叶, 张希明, 李利, 等. 塔里木盆地南缘不同生境盐生草种群分布特征及地上生物量初步估测[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(4): 193–197. [Sun Hongye, Zhang Ximing, Li Li, et al. Estimation on aboveground biomass and the characteristics of population families of the halophilous herbaceous plants in three different areas of south Tarim Basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(4): 193–197.]

[32] Xie H, Zhang H, Ma J, et al. Trend of increasing Holocene summer precipitation in arid Central Asia: Evidence from an organic carbon isotopic record from the LJW10 loess section in Xinjiang, NW China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2018, 509: 24–32.

[33] Wang G, Zhou L, Min L, et al. Altitudinal trends of leaf $\delta^{13}C$ follow different patterns across a mountainous terrain in north China characterized by a temperate semi-humid climate[J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2010, 24(11): 1557–1564.

[34] 郭正堂, 吴海斌, 魏建晶, 等. 用古土壤有机质碳同位素探讨青藏高原东南缘的隆升幅度[J]. 第四纪研究, 2001, 21(5): 392–398. [Guo Zhengtang, Wu Haibin, Wei Jianjing, et al. Tentative estimate of the southeast margin uplift of Qinghai-Xizang Plateau using organic carbon isotope composition of paleosols[J]. Quaternary Sciences, 2001, 21(5): 392–398.]

[35] Beerling D J. Predicting leaf gas exchange and $\delta^{13}C$ responses to the past 30000 years of global environmental change[J]. New Phytologist, 1994, 128(3): 425–433.

[36] Wang G, Li J, Liu X, et al. Variations in carbon isotope ratios of plants across a temperature gradient along the 400 mm isoline of mean annual precipitation in north China and their relevance to paleovegetation reconstruction[J]. Quaternary Science Reviews, 2013, 63: 83–90.

[37] Edwards T, Graf W, Trimborn P, et al. $\delta^{13}C$ response surface resolves humidity and temperature signals in trees[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64(2): 161–167.

[38] Schleser G H, Helle G, Lücke A, et al. Isotope signals as climate proxies: The role of transfer functions in the study of terrestrial archives[J]. Quaternary Science Reviews, 1999, 18(7): 927–943.

[39] Zhao Y, Wu F, Fang X, et al. Altitudinal variations in the bulk organic carbon isotopic composition of topsoil in the Qilian Mountains area, NE Tibetan Plateau, and its environmental significance [J]. Quaternary International, 2017, 454: 45–55.

Composition characteristics of surface soil $\delta^{13}C_{org}$ in the southwest margin of Tarim Basin

JU Li[1,2,3], RAN Min[1,2,3], YANG Yunpeng[1,2,3], WANG Xin[1,2,3]

(1. College of Geography and Environmental Science, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China; 2. National Demonstration Center for Environmental and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China; 3. Henan Key Laboratory of Earth System Observation and Modeling, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China)

Abstract: Soil organic carbon isotopes ($\delta^{13}C_{org}$) can reflect the isotopic composition of growing vegetation and thus further reflect the vegetation type and the related climate. Previous studies have demonstrated that there are significant differences in the relationship between $\delta^{13}C_{org}$ and climate factors in different regions. Therefore, it is essential to analyze the correlation between soil $\delta^{13}C_{org}$ and climate factors in different regions for paleoclimate reconstruction. In our research, two transects of the Pamir Plateau and Qira County, located in the core of the arid region of Central Asia, are selected to analyze the carbon isotopic composition of surface soil and its relationship with climate factors to provide a scientific basis for paleoclimate reconstruction. In this paper, we first obtained 50 topsoil sediment samples and analyzed their organic carbon isotopic composition characteristics. Second, the relationship between soil organic carbon isotopes and climate factors was analyzed in detail. Finally, its potential driving mechanism was preliminarily explored. The results show that there are obvious differences in the relationship between surface soil $\delta^{13}C_{org}$ and climate factors in the Pamir Plateau and Qira County: In terms of temperature, the Pamir region is positively correlated with annual average temperature (r=0.594, P<0.01), warm season temperature (r=0.593, P<0.01), and cold season temperature (r=0.598, P<0.01); the Qira County is negatively correlated with annual average temperature (r=−0.675, P<0.01), warm season temperature (r=−0.684, P<0.01), and cold season temperature (r=−0.646, P<0.01). In terms of precipitation, the correlation between the Pamir region and precipitation is insignificant; the Qira County has a weak negative correlation with the average annual precipitation (r=−0.485, P<0.05), a weak positive correlation with the warm season precipitation (r=0.483, P<0.05), and a significant negative correlation with the cold season precipitation (r=−0.632, P<0.01). Further mechanism analysis shows that the change in surface soil $\delta^{13}C_{org}$ in the two regions is primarily controlled by temperature, but the correlation between surface soil $\delta^{13}C_{org}$ and temperature is different due to the influence of glacier meltwater and the difference in vegetation types in the two regions. The correlation between surface soil $\delta^{13}C_{org}$ and precipitation is insignificant due to glacial meltwater and very little precipitation. Our research shows that when reconstructing paleoclimate using organic carbon isotopes, more attention should be paid to the regional differences in the relationship between organic carbon isotopes and climate factors.

Key words: surface soil $\delta^{13}C_{org}$; temperature; precipitation; correlation analysis; arid area